微粉粒子の新・表面改質, 球形化法に関する研究*

中 村 裕 計^{*1}, 社 河 内 敏 彦^{*2}

A New Surface Fusing, Globular Forming Method of Fine Particle

Hirokazu NAKAMURA and Toshihiko SHAKOUCHI^{*3}^{*3} Graduate School of Engineering, Mie University, 1515 Kamihama-cho, Tsu-shi, Mie, 514-8507 Japan

In this study, a new surface fusing, globular forming method of fine particle by high temperature air jet flow is proposed in order to improve the performance of the former one. First, the flow and heat transfer of a high temperature air jet flow are made clear experimentally. Secondly, the behavior of particle of a few micron meter order in a high temperature air jet flow is examined by numerical analysis and flow visualization. Finally, the performance of a new surface fusing or globular forming system is investigated, and a large improvement and the most suitable shape of the nozzle system are shown.

Key Words: Gas-Solid Jet Flow, Globular Forming, High Temperature Air Jet Flow, Flow and Heat Transfer

1. 結 論

高温空気噴流は, 乾燥や粉体の表面改質, 球形化処理などで広く使用されているが, 中でも粉体処理において高温空気噴流から微粉粒子への伝熱特性は十分に解明されていない。

一般に, 数 μm の大きさの粉体を工業的に大量に製造する方法の一つに, 固気二相噴流を衝突板に衝突させて粗大粒子を粉碎するジェット粉碎法⁽¹⁾がある。粉碎された微粉粒子の形状は凹凸のある不定形状であるが, これら粉体材料の機能を改善・向上させるために粒子形状を均一化, 球形化⁽²⁾する要求がある。例えば, 複写機のカラートナーでは粒子の球形化により, 帯電性の均一化, および耐久性や流動性が向上し, その結果, トナーの転写効率や画質の向上などが可能となる。近年, これらの要求を満たすトナーの製造方法として, 重合法⁽³⁾に代表される化学反応による方法があるが, 使用する有機溶媒の処理や生産コストが高いなどの問題がある。こうした問題に対して, 製造プロ

セスの簡略化, 操作性の簡便性の観点から, 乾式で連続的な処理を行う方法として, ジェット粉碎法で製造された微粉粒子を高温空気噴流中に流入させて溶融し, 粒子の表面張力によって球形化させる方法が注目されている。しかし, 高温空気噴流の生成には大きな熱量が必要であり, そのうえ, 微粉粒子の処理速度が小さいなどのため, 装置のエネルギー効率の改善・向上が望まれている。

本研究では, まず, 高温空気噴流から微粉粒子への伝熱量と表面改質特性の関係を明らかにし, 次いで, 高温空気噴流中に流入された数 μm ~数十 μm の微粉粒子の飛行軌跡を, 数値解析および流れの可視化・観察結果から明らかにした。

さらに, 円形ノズル形表面改質, 球形化装置⁽⁴⁾(図 1, 以後, 円形ノズル形とも呼ぶ)の主ノズルから噴出される高温空気噴流(300°C)と高温空気噴流出口近傍の円周上 4 箇所に設けられた副ノズルからの噴流(20°C)が衝突後, 混合・拡散するようすを温度分布の測定から明らかにし, これらの知見をもとに球形化装置の性能を改善・向上させることを目的として, すべての粒子が均一な高温領域を通過する高温空気噴流の流れ場, 温度場を作り出すために, 三重管ノズル形表面改質, 球形化装置(図 2, 以後, 三重管ノズル形とも呼ぶ)

* 原稿受付 2004 年 3 月 19 日。

^{*1} 三重大学大学院工学研究科(〒514-8507 津市上浜町 1515)。^{*2} 正員, 三重大学大学院工学研究科。

E-mail: shako@mach.mie-u.ac.jp

を新たに提案した。

円形ノズル形では, 供試微粉粒子が主噴流の周りから流入されるのに対し, 新たに提案した三重管ノズル形では, 温度の高い主噴流の中心部に直接流入される。円形ノズル形と三重管ノズル形で表面改質, 球形化を行った場合のエネルギー効率を比較し, 供試微粉粒子(トナー, 軟化点: 120°C)の同一の球形化に対して三重管ノズル形のエネルギー効率が, 円形ノズル形の約5.3倍にもなり非常に優れた球形化特性を有することなどを示す。

2. おもな記号

C_D : 抵抗係数

C_p : 圧力係数 $=2(p-p_a)/(\rho u_\infty^2)$

c_p : 定圧比熱 $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

d : 直径 mm

F : 流量 Nm^3/min

G : 供給速度 kg/h

k : 熱伝導率 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$

L_m : 管端の長さ mm

m : 質量 kg

Nu : ヌッセルト数

p : 圧力 kg/cm^2

Pr : プラントル数

Q_1 : 単位時間あたりの伝熱量 W

Q_2 : 全体の伝熱量 J

Q_3 : 高温空気噴流の熱量 kJ/h

r : 半径方向座標 mm

Re : レイノルズ数

R_p : 平均円形度

T : 温度 $^{\circ}\text{C}$

t : 滞留時間 s

u : 平均流速 m/s

x : 流れ方向座標 mm

η : エネルギー効率 kg/kJ

ν : 動粘性係数 m^2/s

ρ : 密度 kg/m^3

σ : エネルギー効率比

ϕ : 流れ関数

(下付き添字)

a : 空気相

c : 中心線

m : 主ノズル

max : 最大値

mu : 三重管ノズル形

p : 粒子相

s : 副ノズル

se : 二次空気

r : 円形ノズル形

3. 表面改質, 球形化装置の原理と構造

図1, 2にそれぞれ, 円形ノズル形と三重管ノズル形球形化装置の概略図を示す。いずれも, 供試微粉粒子を高温空気噴流中に流入させて微粉粒子を熔融し球形化する装置で, 微粉粒子を分散させる分散領域と高温空気噴流中に微粉粒子を流入させて球形化する表面改質, 球形化領域, および球形化後に微粉粒子を冷却させる冷却領域とから構成されている。なお, これらの球形化装置の構造は簡単で, 機内に可動部分を有さない。

図3に, 実験装置の全体図を示す。主ノズル(円形

Fig. 1 Sulfuring system with pipe nozzle

Fig. 2 New sulfuring system with three nozzle

ノズル)からの高温空気噴流, Air I (300°C)と微粉粒子を含む固気二相噴流, Air II (20°C)および冷却空気流, Air III (20°C)は, 球形化装置⑨内を通った後, サイクロン⑫で微粉粒子と気流に分離され, 気流は集じん機⑬を通してブロウより系外へ排出される。

円形ノズル形では, フィーダ⑩により定量供給された粉体原料は, 粉体供給用エゼクタノズル⑪, 分散部を通った後, 高温空気噴流出口直後近傍の円周上4箇所に設けられた副ノズルから, 球形化領域に噴出される。副ノズル内で急速に加速され完全分散に近い状態で噴出された微粉粒子は, 上部に設けられた主ノズル⑧からの高温空気噴流 Air I 中に噴出される。

新たに提案した三重管ノズル形では, すべての粒子を高温領域を通過させることを意図し, 主ノズルの中心に設置した副ノズルから微粉粒子を噴出する構造とした。また, 微粉粒子が高温領域に噴出される直前で高い分散状態にするため, 副ノズル出口近傍で粒子にせん断力を与えることを意図し, 副ノズル出口部に絞り部を設けた。また, 微粉粒子のさらなる分散状態の向上と主噴流(高温空気噴流)と副噴流(常温空気噴流)の素早い混合を行うことで均一な高温領域をすべての粒子が通過するように, 副ノズル後方に分散板を設置した。さらに, 高温空気噴流中に流入する直前で, 微粉粒子にせん断力を加えることで完全分散状態に近い状態になるように二次空気を周囲から導入した。この二次空気は, 分散板の冷却効果も意図している。

三重管ノズル形の場合, フィーダ⑩により定量供給された粉体原料は, 粉体供給用エゼクタノズル⑪で吸引され主ノズル内の中心位置に設置した副ノズル内で急速に加速され, 副ノズル出口の後方の分散板に衝突

し, より完全分散に近い状態となる。その後, 微粉粒子は, 分散板外周方向に飛跡を変え, また, 周囲より導入される二次空気によるせん断力を受け, 高い分散状態で球形化領域に噴出される。噴出された微粉粒子は, 最外周の主ノズル⑧からの高温空気噴流 Air I 中に噴出される。その後, 円形ノズル形および三重管ノズル形の場合, ともに高温空気噴流中に流入した微粉粒子(トナー)の温度は軟化点(120°C)まで上昇し熔融状態になり, 粒子自身の表面張力により球形化される。その後, 外部から導入された冷却空気流 Air III により冷却, 固化されサイクロンで捕集される。

4. 数値解析

主噴流に向かって微粉粒子を含む副噴流が噴出される流れ場(図4)の流動状態と微粉粒子の飛行飛跡について, 数値的な解析を試みた。まず, 単相空気流の流れ場を Navier-Stokes 式, 連続式, $k-\varepsilon$ 乱流モデルによる乱流輸送方程式を有限差分法で解くことから明らかにした。乱流成分は, ラングムシミュレーションで評価した。次いで, この流れ場に副ノズルから単一の球形粒子が空気噴流とともに噴出された場合の飛行軌跡を, 次の粒子の運動方程式を解くことから求めた。

$$m_p \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = C_D \pi d_p^2 \rho_a (\mathbf{u}_a - \mathbf{u}_p) |\mathbf{u}_p - \mathbf{u}_a| + m_p g (1 - \rho_a / \rho_p) \quad (1)$$

なお, 粒子の抵抗係数 C_D は次式で与えた。

$$C_D = 24 / Re_p \quad (2)$$

粒子が気相に与える影響, および粒子同士の衝突は考慮していないが, 本研究では粒子の質量比が小さいので問題ないと考えられる。

図4に, 球形化部のフローモデルと座標系, および記号の一部を示す。流れは軸対称なので, r の正の領

Fig. 3 Experimental set up

Fig. 4 Flow model

域のみが示されている。空気噴流は、直径 $d=38.4$ mm の主ノズルから平均流速 $u_m=33$ m/s で噴出される。副ノズルの直径は $d_s=4$ mm で、主ノズル出口中心から $(x, r)=(12, 27)$ mm の位置に r 方向に対して 30° の角度で円周上の 4 箇所に設置され、微粉粒子を含む固二相噴流が平均流速 $u_s=33$ m/s で噴出される。粒子径 $d_p=2, 5, 10$ μm 、真比重 $\rho_p=600$ kg/m³ の粒子を副ノズルの中心から噴出させた。流出位置における粒子の初期速度は、気相の速度と同一とし、運動方程式の解法にはルンゲ・クッタ法⁽⁵⁾を用いた。計算領域は $x \times r=576 \times 269$ mm の領域を、それぞれ 155×269 の不等間隔格子で分割し数値解析に供した。

5. 実験装置と実験方法

5.1 微粉粒子への伝熱量と球形化特性 微粉粒子 [ポリエステル系トナー, 平均円形度(円相当径の円周長さを粒子の投影像の周囲長さで除したもの): $R_p=0.919$, 平均粒子径: $d_{p50}=8.8$ μm , 密度: $\rho_p=600$ kg/m³, 軟化点: $T_{\text{mel}}=120^\circ\text{C}$] を溶融, 球形化するために必要な微粉粒子への伝熱量(温度場と微粉粒子の滞留時間)を、図 5 に示す環状ノズルを用いて検討する。内径 $d_m=54.5$ mm の主ノズルの出口平均流速を $u_m=21$ m/s=一定とし、噴流温度を、 $T=150, 250, 300^\circ\text{C}$ (図 3 の熱電対⑦で測定)と変化させて、微粉粒子を、内径 $d_s=5.0$ mm の分散副ノズルから平均流速 $u_s=21$ m/s で高温空気噴流の中心から噴出させた。また、微粉粒子の高温領域での滞留時間を制御するために、管端の長さ L_m を 0~400 mm に変化させた。

微粉粒子の球形化性能は、平均円形度で評価した。円形度の測定には、単一粒子の投影像から画像処理で球形度合を求めるフロー式粒子像分析装置 [シスメックス(FPIA-2100)] を使用した。微粉粒子($d_p=8.8$ μm)への単位時間あたりの伝熱量 Q_1 は、以下の式⁽⁶⁾で求められる。ただし、粒子速度は気相の速度と同一とした。

$$Q_1 = \pi k d_p (T - T_p) (2 + 0.6 Re_p^{0.5} Pr^{0.33}) \dots\dots (3)$$

ここで、

$$Re_p = (u_m - u_p) d_p / \nu \dots\dots\dots (4)$$

したがって、時間 t の間の伝熱量 Q_2 は

$$Q_2 = Q_1 t \dots\dots\dots (5)$$

5.2 高温空気噴流の温度場の測定 円形および三重管ノズル形の主ノズルからの高温空気噴流の温度分布をサーモグラフィー [日本アビオニクス(TVS-2000 MK 2)] を用いて測定した。ただし、空気などの気体自体からは赤外線放射がないため、高温空気

Fig. 5 Shape of annular nozzle

噴流の温度分布を直接測定することはできない。本実験では、厚さ 1 mm、長さ 400 mm、幅 100 mm の天然ゴム板を、主ノズル出口中心断面の流れ方向に設置し、高温空気噴流によって加熱されたゴム板の温度分布が定常状態になった後に、ゴム板から放射される赤外線をサーモグラフィーで測定しそれを高温空気噴流の温度分布として求めた。また、物質固有の放射率による影響をなくすため、ノズル出口での熱電対による温度測定値とサーモグラフィーの温度測定値とが一致するように放射率の校正を行った。

5.3 微粉粒子の球形化特性 微粉粒子の球形化特性は、図 1, 2 に示す円形ノズル形および三重管ノズル形⑨を使用して検討した。高温空気噴流(主ノズル)の流量は $F_m=1.0$ Nm³/min、噴流温度は円形ノズル形の主ノズル出口での最大温度 $T_{\text{max}}=300^\circ\text{C}$ =一定とした。それに対し、三重管ノズル形の主ノズル出口で最大温度は $T_{\text{max}}=250, 300^\circ\text{C}$ と変化させた。微粉粒子を噴出させる副ノズル出口平均流速は、両者の場合ともに $u_s=33$ m/s=一定である。また、三重管ノズル形の二次空気流量は、 $F_{se}=0.16$ Nm³/min である。

円形ノズル形では、フィード⑩からの微粉粒子(ポリエステル系トナー)の供給速度は $G=0.3, 1.3, 2.7$ kg/h で、三重管ノズル形では、 $G=6.0$ kg/h=一定である。球形化された微粉粒子は、平均円形度とカップリング [粒子同士の造粒度合, =(改質後の 50%粒子径)-(改質前の 50%粒子径)] で球形化特性を評価した。カップリングの測定には、粒度測定器 [コールタ (Multisizer II)] を使用した。

6. 結果と考察

6.1 微粉粒子への伝熱量と球形化特性 図 6 に、各温度における微粉粒子の平均円形度と微粉粒子の高

高温領域通過時間 t との関係を示す。 t は、主ノズル内通過時間 ($\Delta t_1 = L_m/u_s$) とノズル出口以降で微粉粒子の球形化に寄与する高温領域通過時間 Δt_2 の和である。ノズル出口以降の高温領域滞留時間 Δt_2 は、高温空気噴流の温度 $T=150^\circ\text{C}$ の実験結果 (図 6 中、◆印) を表す線形の最小二乗法を用いて求めた曲線が供試原料の平均円形度 $R_p=0.919$ と交わる点を求めると L_m が 0 mm の位置での高温領域滞留時間は、 $\Delta t_2 \approx 1.4 \times 10^{-2}$ s となる。なお、この時間は、 $T=250, 300^\circ\text{C}$ の場合も同様であると仮定した。

$T=150^\circ\text{C}$ の場合、平均円形度は t の増加とともにあまり大きく向上しないが、温度が高い $T=250, 300^\circ\text{C}$ の場合には、高温領域通過時間が短いにもかかわらず、平均円形度が $R_p \approx 0.97$ まで急速に増大する。

図 7 は、平均円形度と式 (3)～(5) を用いて求めた高温空気噴流から微粉粒子 $d_p=8.8 \mu\text{m}$ への伝熱量との関係を示す。図 7 にはまた、粒子形状がわかる SEM の写真を示した。平均円形度は、微粉粒子への伝熱量が増加するとともに改善・向上される⁽⁷⁾。このことは、SEM の写真から明りょうに見てとれる。

また、平均円形度と伝熱量との関係は、

Fig. 6 Roundness and residence time

Fig. 7 Roundness and heat transfer rate to fine particle

$$R_p = (-4.84 \times 10^9) Q_2^2 + 36\,000 Q_2 + 0.91 \quad \cdots (6)$$

ただし、 $R_p[-]$ 、 $Q_2[\text{J}]$ である。

6・2 高温空気噴流の温度場 図 8, 9 は、円形ノズル形および三重管ノズル形の高温空気噴流の温度分布を示す。主ノズルからの高温空気噴流の流量は $F_m = 1.0 \text{ Nm}^3/\text{min}$ 、主ノズル出口での噴流温度は最大温度 $T_{\text{max}} = 300^\circ\text{C}$ 、それぞれの副ノズル出口平均流速は $u_s = 33 \text{ m/s}$ である。また、三重管ノズル形の二次空気流量は、 $F_{se} = 0.16 \text{ Nm}^3/\text{min}$ である。

円形ノズル形の場合、主ノズルからの高温空気噴流は副ノズルからの噴流と衝突、干渉し、中心方向へ縮流する。その後、副噴流と混合し、中心線上温度 T_c は、下流に向かって急速に減衰する。また、供試トナー微粉粒子の軟化点が $T_{\text{mei}} = 120^\circ\text{C}$ なので、高温領域を $T_c > 120^\circ\text{C}$ の領域とすると、それは $x/d < 3$ まで存在する。

三重管ノズル形の場合、主ノズルからの高温空気噴流は、主ノズル中心位置に設置された副ノズルからの噴流と二次空気噴流が分散板に衝突し、その周囲に沿って流れるため環状に流下する。また、常温の副噴流と二次空気噴流は、 $x/d \approx 0.5$ で半径方向に最も大きく広がり下流にいくにつれ高温空気噴流と混合するため、中心線上温度 T_c は上昇し、 $x/d \approx 3$ で最大 $T_c = 180^\circ\text{C}$ となる。また、 $T_c > 120^\circ\text{C}$ の高温領域は、 $x/d < 4$ の領域まで存在する。

6・3 数値解析 図 10 に、円形および副ノズルの出口平均流速が $u_m, u_s = 33 \text{ m/s}$ の場合の流動特性を流線と等圧線 (計算結果) で示す。図 10 中の数値はそれぞれ、流れ関数 Ψ 、圧力係数 $C_p = [2(p - p_a)/(\rho u_m^2)]$ の値である。円形ノズルからの噴流は副ノズルからの噴流と衝突、干渉し、いくぶん中心方向へ縮流する。また圧力は、円形ノズルからの噴流と副ノズルからの噴流との衝突部で大きな値をとり、下流方向に向かって減少する。

図 11 に、前記の流れ場中を飛行する粒径 $d_p = 2, 5, 10 \mu\text{m}$ の微粉粒子の飛行軌跡を示す。粒子は円形ノズルからの噴流流れの影響を強く受け下流方向に軌跡を曲げ、その後流れに従って飛行する。粒径の小さな粒子 ($d_p = 2 \mu\text{m}$) は、その慣性力が小さく気相の運動が支配的になるためそれに従って軌跡を大きく曲げ、空気噴流の中心部に到達せずに噴流の流れに沿って進む。粒径が大きくなると ($d_p = 10 \mu\text{m}$)、粒子の慣性力が大きくなるので直線的に飛行する区間が長くなるが、主噴流の中心部に到達する前に噴流の流れに従って飛行する。上記の解析結果から、 $d_p = 10 \mu\text{m}$ までの微粉粒子は主ノズルより噴出された空気噴流の中心部には

Fig. 8 Temperature profile of the pipe nozzle

Fig. 9 Temperature profile of the three nozzle

到達せず，噴流の外側を飛行する。供試粒子の50%粒子径は $d_p = 8.8 \mu\text{m}$ で， $10 \mu\text{m}$ 以上の粒子の個数は約10%程度であることから，粒子の大部分は先に述べた高温空気噴流の外側(低温領域)を飛行していると考えられる。

図12, 13は，上述の温度場中を飛行する微粉粒子の飛行軌跡を可視化・記録し，その飛行範囲をスケッチ

Fig. 10 Flow characteristics

Fig. 11 Particle trajectory (calculation)

を示す。供試粒子は，前述のポリエステル系トナーである。

円形ノズル形の場合，微粉粒子の飛行軌跡は， $x/d \approx 1.4$ で高温空気噴流の中心部に到達するものから，同時に噴流外縁部に沿って飛行するものがあり，下流に向かって広がりながら飛行する。

三重管ノズル形の場合，微粉粒子の飛行軌跡は， $x/d \approx 0.3$ で半径方向に最も大きく広がり，その後，高温空気噴流の流れに従って飛行する。

微粉粒子の飛行軌跡の数値解析結果，および可視化・観察結果から，円形ノズル形の場合，大部分の粒子が噴流の外側領域($T < 120^\circ\text{C}$)を飛行するのに対し，三重管ノズル形では，ほとんどすべての粒子が $T > 200^\circ\text{C}$ の領域を通過する。

以上の結果より，新たに提案した三重管ノズル形で

Fig. 12 Particle trajectories of the pipe nozzle

Fig. 13 Particle trajectories of the three nozzle

は, すべての粒子を $T > 200^\circ\text{C}$ の高温の温度場を飛行させることができることがわかった。

6.4 球形化特性 図 14 に表面改質性能を, 平均円形度とカップリングで示す。

円形ノズル形では, 粒子の供給速度を増加させると, 平均円形度は減少しカップリングは増加する。この際, 平均円形度の減少は, 高温空気噴流中での粒子の個数が増加するため, 粒子 1 個に与えられる伝熱量が減少したことによると考えられる。また, カップリングの増加は, 高温空気噴流中での粒子の個数が増加するため粒子同士の衝突が増加したことによると考えられる。

三重管ノズル形では, 高温空気噴流の温度が増加す

Fig. 14 Roundness and coupling

ると, 平均円形度とカップリングはともに増加する。この際, 平均円形度の増加は, 高温空気噴流から粒子に与えられる伝熱量が増加することによると考えられる。また, カップリングの増加は, 高温領域が流れ方向に長いため粒子同士の衝突が増加することによると考えられる。

円形, および三重管ノズル形の球形化性能は, 図 14 中の実線と破線の交点より求めることができる。すなわち, 三重管ノズル形で交点の平均円形度 $R_p = 0.953$ とカップリング $\Delta d_p = 0.27 \mu\text{m}$ を得ることができるのは, 供給速度が $G = 6.0 \text{ kg/h}$, 高温空気噴流の温度が $T \approx 260^\circ\text{C}$ の場合である。この場合の円形および三重管ノズル形のエネルギー効率 η_r, η_{mu} (供給速度 (G : kg/h)/高温空気噴流の熱量 ($Q_3 = mc_p T$: kJ/h) [kg/kJ]) を求め, それらの比, すなわちエネルギー効率比 $\sigma (= \eta_{mu}/\eta_r)$ を算出すると, 約 5.3 を得る。

すなわち, 三重管ノズル球形化装置のエネルギー効率は, 円形ノズル形の約 5.3 倍になり, 大きく改善・向上される。

7. 結 論

円形, および新たに提案した三重管ノズルからの噴流の伝熱特性, およびそれらの高温空気噴流を使った微粉粒子の表面改質, 球形化特性について検討した。

得られたおもな結果は, 以下のようである。

(1) 新たに提案した三重管ノズル球形化装置は, 円形ノズル形に比べ, 微粉粒子をより高温領域に流入させることができる。

(2) 球形化特性(平均円形度 R_p)は, 微粉粒子への伝熱量 $Q_2 [\text{J}]$ の増加とともに大きくなり以下の関係で示すことができる。

$$R_p = (-4.84 \times 10^9) Q_2^2 + 36000 Q_2 + 0.91$$

ここで, $Q_2 [\text{J}]$

(3) 三重管ノズル形球形化装置のエネルギー効率は, 円形ノズル形の約5.3倍になり, 大きく改善・向上される。

文 献

- (1) 日本化学工学会, 化学工学ハンドブック, (1988), 836-837, 丸善.
- (2) 日本粉体工学会, 粉碎・分級・表面改質, (2001), 538-539, NGT.
- (3) 清水淳, 電子写真用トナーの特性制御と高機能化, 日本粉体工学会誌, No.38(2001), 506-507.
- (4) 中村裕計・社河内敏彦・楠田敦, 微粉粒子の表面改質・球形化における高温空気噴流の流動と伝熱特性, 日本化学工学論文集, No.6(2003), 836-841.
- (5) 狩野武, 粉体粒子の挙動, (1977), 278-281, 産業技術センター.
- (6) Crow, C. T., Sharma, M. P. and Stock, D. E., The Particle-Source-In-Cell Model for Gas-Droplet Flows, *Trans. ASME, J. Fluids Eng.*, **99**-2 (1977), 325-332.
- (7) 社河内敏彦・中村裕計・森本洋史・奥本昌宏, 高温空気噴流の流動伝熱特性とその応用, 日本機械学会講演論文集, No.03-30 (2003), 283-284.